

Численное исследование влияния физико-химических свойств жидкого горючего на эффективность рабочего процесса ракетного двигателя малой тяги

© А.В. Новиков, Е.А. Андреев, Е.И. Бардакова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В ракетно-космической технике широкое распространение получили ракетные двигатели малой тяги, используемые для коррекции положения летательного аппарата на орбите, для управления движением по траектории и т. п. Их количество в составе двигательной установки — от одного до нескольких десятков единиц. Естественно, от эффективности их работы существенно зависит совершенство двигательной установки в целом. Объект исследования — камера сгорания ракетного двигателя малой тяги, работающая по схеме газ — жидкость. Для определения влияния различных факторов на характеристики рабочего процесса в камере сгорания были проведены расчетно-параметрические исследования. Расчетным путем получены зависимости коэффициента расходного комплекса и параметров рабочего процесса камеры ракетного двигателя малой тяги от факторов, влияющих при использовании на качество горючего этанола и керосина. Выполнен сравнительный анализ результатов применения этих двух компонентов в сходных условиях, что позволило выяснить влияние физико-химических свойств горючего компонента на эффективность организации рабочего процесса. Полученные результаты можно применять при проектировании двигателей малой тяги, работающих на компонентах топлива керосин — кислород, этанол — кислород.

Ключевые слова: камера сгорания, коэффициент камеры, математическая модель

Введение. Одной из основных проблем, встающей при создании камер ЖРД, является организация эффективного рабочего процесса, определяемого смесеобразованием компонентов топлива, тепловым состоянием конструкции камеры сгорания (КС) и коэффициентом расходного комплекса [1–4].

Цель статьи — представить сравнительный анализ характеристик рабочего процесса, где в качестве горючего используется керосин и этанол, чтобы выяснить, как влияют на эти характеристики свойства жидкого компонента. Для этого были проведены исследования [1], в результате которых:

– разработана расчетная модель процессов в КС РДМТ тягой ~50 Н на топливе газообразный кислород — керосин;

– составлена система уравнений, описывающая рабочий процесс в КС РДМТ, а также создана программа расчета распределения параметров по ее объему;

– выполнен контрольный расчет распределения параметров по объему КС РДМТ.

Все приведенные действия [1] подтвердили целесообразность применения предложенного подхода на стадии предварительного проектирования КС РДМТ, поскольку он позволяет существенно сократить количество дорогостоящих огневых испытаний при отработке вновь создаваемых двигателей [5, 6].

При определении влияния различных факторов на характеристики рабочего процесса в КС в качестве исследуемых параметров были приняты:

- диаметр капель жидкого компонента в исходной газожидкостной смеси, подаваемой в КС, при базовых значениях геометрических и режимных параметров КС;
- длина цилиндрической части КС при переменном диаметре капель жидкого компонента;
- режимные параметры — давление в КС и соотношение компонентов при переменном диаметре капель жидкого компонента для базовой геометрии КС.

Для всех указанных параметров проводился сравнительный анализ влияния каждого из них на характеристики рабочего процесса в случае использования в качестве жидкого компонента керосина и этилового спирта.

Рабочий процесс в КС РДМТ должен отвечать целому ряду требований, основное из которых — обеспечение работы двигателя с максимальным коэффициентом расходного комплекса (φ_B).

Действительный расходный комплекс (β_d) определяется в первую очередь полнотой сгорания топлива. Он зависит от многих факторов, таких как тонкость распыливания компонентов топлива, распределение концентраций окислителя и горючего по поперечному сечению КС, процессов испарения и смешения компонентов топлива как в жидкой, так и газовой фазе, воспламенения, горения и др.

Рабочий процесс в КС, расчетная схема и основные допущения. Необходимое условие устойчивого протекания рабочего процесса в КС РДМТ — подвод от высокотемпературной зоны (от фронта пламени) к жидкому компоненту (керосину) достаточного количества тепловой энергии для его нагрева, испарения и воспламенения. Решающую роль в этом явлении играют обратные токи, появляющиеся вследствие эжектирующего эффекта при подаче в КС компонентов.

Таким образом, в КС могут возникать большие локальные градиенты основных параметров газового потока и возвратные течения.

За границу раздела зон подготовительных процессов и горения примем поверхность, где смесь достигает температуры воспламенения топлива.

Конструкция рассматриваемой КС двигателя представлена на рис. 1, расчетная схема камеры (для сечений по горизонтали — JA, JC, JN

и по вертикали — IC, ICZ, IN) — на рис. 2. Через отверстие *A* подается расход кислорода на свечу, через периферийную щель *C* — расход кислорода на периферийную завесу, остальные компоненты топлива в виде равномерной смеси проходят через радиальную щель *B*. При подаче через щели *B* и *C* происходит закрутка потока. Образовавшиеся продукты сгорания истекают через сопло *D*.

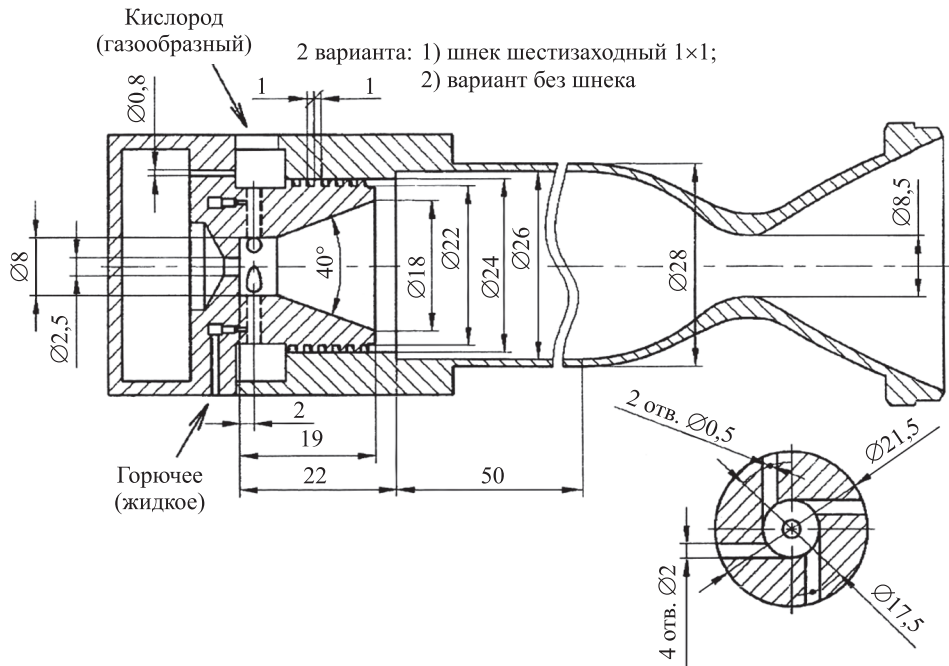


Рис. 1. Конструкция рассчитываемой камеры двигателя:

компоненты топлива — газообразный кислород и керосин; номинальная тяга — 50 Н; номинальное соотношение компонентов топлива — 2,2; номинальное давление в КС — 0,5 МПа

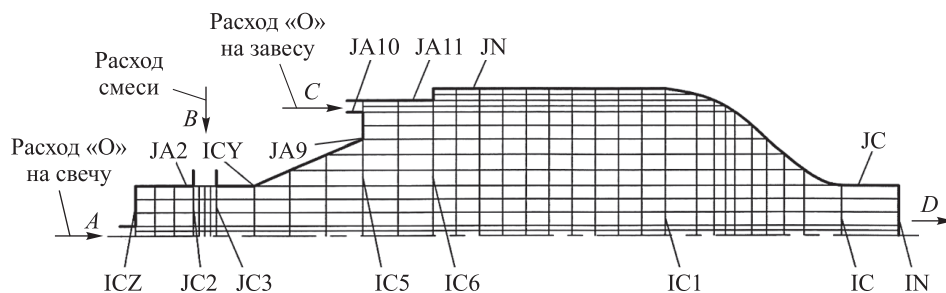


Рис. 2. Расчетная схема камеры сгорания

Расчеты проводили для случая, когда оба компонента поступают в КС через щель *B* для газожидкостной смеси с монодисперсным составом капель жидкого компонента.

Течение в КС двухфазной смеси (жидкий керосин или этанол и газообразный кислород) требует принятия некоторых допущений, обусловленных скоростной и температурной неравновесностью.

Одна из трудностей, препятствующих применению численных методов для расчета испарения капель жидкого горючего, обусловлена их полидисперсностью. Затраты машинного времени с учетом распределения капель по размеру достаточно велики, но это учитывается посредством применения эквивалентного диаметра, в качестве которого принят среднемассовый диаметр капель.

Вследствие экзотермических химических реакций, протекающих в КС, устанавливаются определенный химический состав и температура рабочего тела. Для определения температуры продуктов сгорания (рабочего тела) требуется выполнить термодинамический расчет в каждом узле исследуемого объема для каждой итерации, что приводит к большим затратам машинного времени и затрудняет решение поставленной задачи. Однако этот недостаток устраняется путем замены множества химических реакций одной одностадийной реакцией, а также введением эмпирических поправочных функций для согласования расчетной температуры, определенной по энтальпиям компонентов, с термодинамической температурой, полученной путем термодинамических расчетов [7].

Для решения поставленной задачи приняты следующие основные допущения:

- 1) задача стационарная;
- 2) теплоотвод в стенку отсутствует;
- 3) коэффициенты переноса массы и энергии равны эффективно-му коэффициенту турбулентной вязкости;
- 4) влияние гетерогенности потока на эффективный коэффициент турбулентной вязкости учитывается через плотность смеси;
- 5) газ подчиняется закону состояния идеального газа;
- 6) капли жидкого горючего на входе в КС монодисперсны;
- 7) в каждой ячейке диаметры капель жидкого горючего приводятся к среднемассовому;
- 8) химическая реакция между окислителем (кислород) и горючим (пары керосина или этанола) является одностадийной и протекает мгновенно;
- 9) в КС процесс считается изобарическим; базовое распределение давления по докритической части сопла определяется с помощью среднего показателя изоэнтропии истечения, определенного по результатам термодинамического расчета [7].

Основные уравнения и результаты их решения. При решении уравнений задают следующие исходные данные:

- характерные геометрические размеры КС;
- давление в камере сгорания $p_{КС}$;

суммарное соотношение компонентов топлива $K_{m\Sigma}$;

исходный диаметр капле жидкого компонента d_k .

В результате решения задачи получаем:

распределение параметров по объему КС (напряженность вихря, функция тока, температура рабочего тела, плотность рабочего тела, осевые, окружные и радиальные скорости и т. д.);

коэффициент расходного комплекса φ_β ;

другие параметры, необходимые для оценки состояния КС на этапе проектирования.

Для определения свойств компонентов рабочей смеси (теплоемкость, плотность, теплопроводность, энтальпия и т. д.) используют справочные данные [8–10]. При этом считается, что в качестве жидких горючих применяют керосин и 96%-ный водный раствор этилового спирта (по объему).

Основные исходные данные по компонентам топлива и режимным параметрам камеры, которые используются при давлении 0,5 МПа в математической модели и программе расчета, следующие:

	Керосин	Этанол
Температура воспламенения, К	793	763
Плотность жидкости, кг/м ³	850	790
Удельная теплота испарения, кДж/кг	343	919
Энтальпия, кДж/кг	-1747,5	-5093,3
Температура кипения, К	440	400
Удельная теплоемкость, кДж/(кг · К)	0,88	2,9

Режимные параметры камеры:

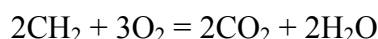
среднее массовое соотношение компонентов топлива для пары керосин — кислород $K_m = 2,2$;

среднее массовое соотношение компонентов топлива для пары этанол — кислород $K_m = 1,34$;

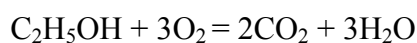
коэффициент избытка окислителя для обоих пар компонентов $\alpha = 0,64$;

давление в камере сгорания $p_k = 0,5$ МПа.

Для обеих пар компонентов (керосин — кислород и этанол — кислород) использовано представление об одностадийной химической реакции. В качестве такой реакции для пары керосин — кислород применима формула



В качестве одностадийной химической реакции для пары этанол — кислород применима формула



В соответствии с уравнением химической реакции для пары керосин — кислород при избытке керосина ($\alpha \leq 1$) имеем

$$\begin{cases} z_{\text{CO}_2} = z_{\text{CO}_2} + \frac{88}{96} z_{\text{O}_2}; \\ z_{\text{H}_2\text{O}} = z_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{36}{96} z_{\text{O}_2}; \\ z_{\text{CH}_2 \text{ пар}} = z_{\text{CH}_2 \text{ пар}} - \frac{28}{96} z_{\text{O}_2}; \\ z_{\text{O}_2} = 0, \end{cases}$$

соответственно при избытке кислорода $\alpha > 1$:

$$\begin{cases} z_{\text{CO}_2} = z_{\text{CO}_2} + \frac{88}{28} \cdot z_{\text{CH}_2 \text{ пар}}; \\ z_{\text{H}_2\text{O}} = z_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{36}{28} \cdot z_{\text{CH}_2 \text{ пар}}; \\ z_{\text{O}_2} = z_{\text{O}_2} - \frac{96}{28} \cdot z_{\text{CH}_2 \text{ пар}}; \\ z_{\text{CH}_2 \text{ пар}} = 0. \end{cases}$$

Для пары этанол — кислород при избытке этанола ($\alpha \leq 1$) имеем

$$\begin{cases} z_{\text{CO}_2} = z_{\text{CO}_2} + \frac{88}{96} z_{\text{O}_2}; \\ z_{\text{H}_2\text{O}} = z_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{54}{96} z_{\text{O}_2}; \\ z_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH пар}} = z_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH пар}} - \frac{46}{96} z_{\text{O}_2}; \\ z_{\text{O}_2} = 0, \end{cases}$$

следовательно, при избытке кислорода ($\alpha > 1$):

$$\begin{cases} z_{\text{CO}_2} = z_{\text{CO}_2} + \frac{88}{46} z_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH пар}}; \\ z_{\text{H}_2\text{O}} = z_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{54}{46} z_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH пар}}; \\ z_{\text{O}_2} = z_{\text{O}_2} - \frac{96}{46} z_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH пар}}; \\ z_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH пар}} = 0. \end{cases}$$

Согласование расчетной и термодинамической температуры реагирующей смеси путем введения условной теплоемкости кислорода было заменено на согласование с помощью аппроксимирующих зависимостей.

В этом случае теоретическое значение расходного комплекса β_T (м/с) определяется путем термодинамического расчета для условий его проведения по [7].

Для удобства работы составлены (с погрешностью $\sim 5\%$) аппроксимирующие зависимости $\beta_T = f(\alpha)$ для расчетного значения давления в КС ($p_k = 0,5$ МПа) в диапазоне изменения $\alpha = 0,4 \dots 1,2$. Результаты расчетов показали слабую зависимость β_T от давления в КС, что позволило использовать полученные аппроксимирующие зависимости во всем расчетном диапазоне изменения p_k . Для учета влияния диссоциации на элементный состав реагирующей газовой смеси аналогичные зависимости были составлены для газовой постоянной, показателя политропы и удельной теплоемкости. Ниже приведены зависимости, использованные в программе расчета.

Пара компонентов керосин — кислород:

газовая постоянная, кДж/(кг К) — $R_r = 581,808 - 412,732\alpha + 144,6332\alpha^2$;

показатель политропы — $n = 1,420369 - 0,5571677\alpha + 0,2658144\alpha^2$;

удельная теплоемкость, кДж/кг — $C_p = 2,405145 - 0,5426375\alpha + 0,073923\alpha^2$

Расходный комплекс:

$\beta_T = 1554,6$ для $\alpha < 0,4$;

$\beta_T = 1554,6 + (269,27/0,2)(\alpha - 0,4)$ для $0,4 < \alpha < 0,6$;

$\beta_T = 1819,7 - (1,27/0,2)(\alpha - 0,6)$ для $0,6 < \alpha < 0,8$;

$\beta_T = 2064,48 - 332,5636\alpha + 33,16726\alpha^2$ для $0,8 < \alpha < 1,2$.

Пара компонентов этанол — кислород:

газовая постоянная, кДж/(кг К) — $R_r = 623,633 - 468,833\alpha + 195,463\alpha^2$;

показатель политропы — $n = 1,39943 - 0,622075\alpha + 0,335875\alpha^2$;

удельная теплоемкость, кДж/кг — $C_p = 2,85471 - 1,044825\alpha + 0,255625\alpha^2$.

Расходный комплекс:

$\beta_T = 1562,14$ для $\alpha < 0,4$;

$\beta_T = 1562,14 + (184,83/0,2)(\alpha - 0,4)$ для $0,4 < \alpha < 0,6$;

$\beta_T = 1746,97 - (6,51/0,2)(\alpha - 0,6)$ для $0,6 < \alpha < 0,8$;

$\beta_T = 1740,46 - (48,94/0,2)(\alpha - 0,8)$ для $0,8 < \alpha < 1,0$;

$\beta_T = 1691,52 - (47,26/0,2)(\alpha - 1,0)$ для $1,0 < \alpha < 1,2$.

На основе работ кафедры Э1 «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана была уточнена и дополнена методика расчета процесса испарения капель горючего в парах окислителя. Некоторые положения этой методики представлены в работе [1]. С помощью программы расчета проведены исследования рабочего процесса в КС в следующих диапазонах изменения параметров: по p_k — от 0,5 до 1,5 МПа; по α — от 0,4 до 1,2; по d_k — от 30 до 100 мкм; по $L_{цкс}$ — от 10 до 90 мм.

При исследовании влияния исходного диаметра капель жидкого горючего на коэффициент расходного комплекса переменным является диаметр капель жидкого горючего в смеси газ — жидкость, поступающей в КС. Цель исследования — установить предельный минимальный размер капель $d_{k\min}$, при котором влияние этого параметра на коэффициент расходного комплекса элиминируется. За величину $d_{k\min}$ принимаем такой размер капель, при котором $\varphi_\beta = 0,99$.

Исследовано также влияние на величину $d_{k\min}$ характеристик жидкого горючего на примерах использования в качестве этого компонента керосина и этанола.

Зависимости $\varphi_\beta = \varphi_\beta(d_k)$ для исследуемой КС для двух пар компонентов керосин — кислород и этанол — кислород соответственно представлены на рис. 3 и 4.

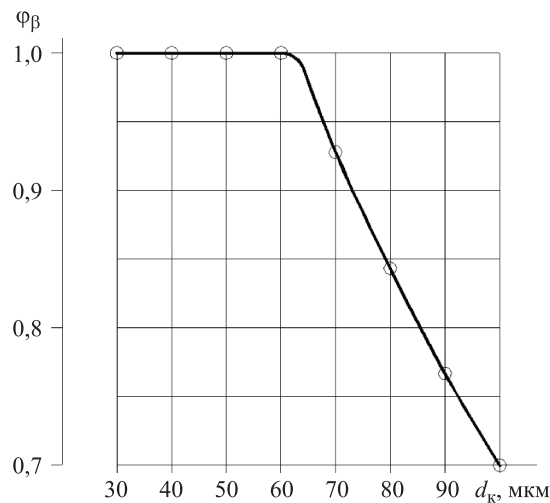


Рис. 3. Зависимость $\varphi_\beta = f(d_k)$ для компонентов топлива кислород — керосин при $p_k = 0,5$ МПа, $\alpha = 0,64$

На рис. 4 видно, что влияние d_k элиминируется для керосина при значении $d_{k\min к} = 62$ мкм, а для этанола — при значении $d_{k\min э} = 37$ мкм. Тот факт, что $d_{k\min э} < d_{k\min к}$ может быть объяснен, в частности, большей теплотой испарения этанола и его меньшей энтальпией, что при схожих условиях приводит к его худшему испарению.

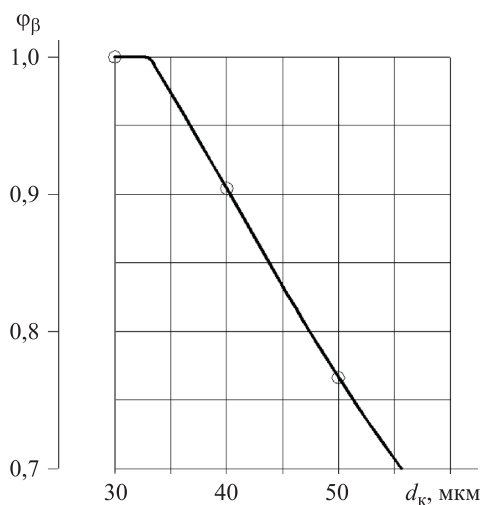


Рис. 4. Зависимость $\Phi_\beta = f(d_k)$ для компонентов топлива кислород — этанол при $p_k = 0,5$ МПа, $\alpha = 0,64$

При исследовании влияния диаметра каплей жидкого горючего на коэффициент расходного комплекса, когда цилиндрическая часть КС имеет переменную длину, изучалась зависимость диаметра каплей $d_{k \min}$ от длины цилиндрического участка исследуемой КС.

Расчетные зависимости $\Phi_\beta = \Phi_\beta(L_{ц \text{ КС}})$ при различных значениях d_k для пары керосин — кислород представлены на рис. 5.

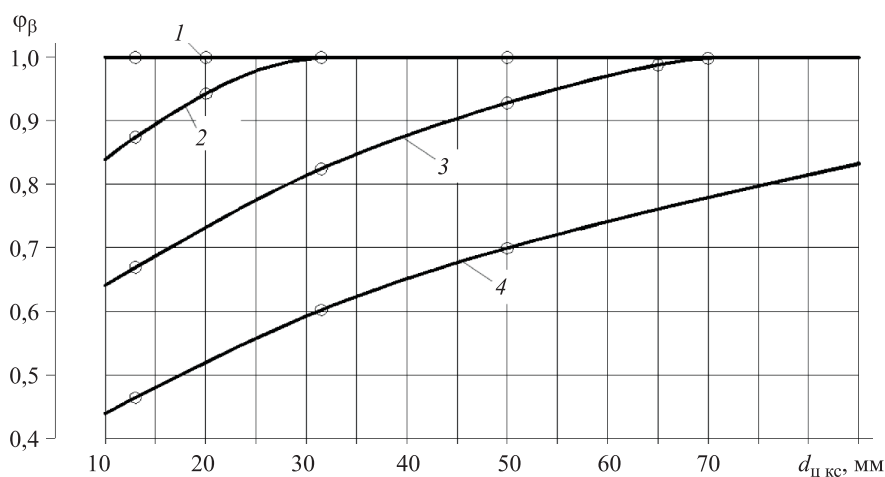


Рис. 5. Зависимость $\Phi_\beta = f(L_{ц \text{ КС}})$ для компонентов топлива кислород — керосин при $p_k = 0,5$ МПа, $\alpha = 0,64$ и различных начальных диаметрах каплей керосина: $d_k = 30$ мкм (1), 50 мкм (2), 70 мкм (3), 100 мкм (4)

Общая тенденция к росту полноты сгорания топлива с увеличением длины КС легко прослеживается на рис. 5. Также можно сделать вывод, что влияние диаметра каплей керосина в исследуемом

диапазоне изменения длины цилиндрической части КС элиминируется при $d_{k \text{ minmin}} = 30$ мкм. Это позволяет сделать вывод, что при такой и меньших толщинах распыливания полное испарение капель керосина происходит уже на начальном участке КС.

Аналогичные зависимости для пары этанол — кислород показаны на рис. 6. На рисунке видно, что значение $d_{k \text{ minmin}} < 30$ мкм, поскольку при $d_k = 30$ мкм наблюдается снижение φ_β при $L_{ц \text{ КС}} < 50$ мм.

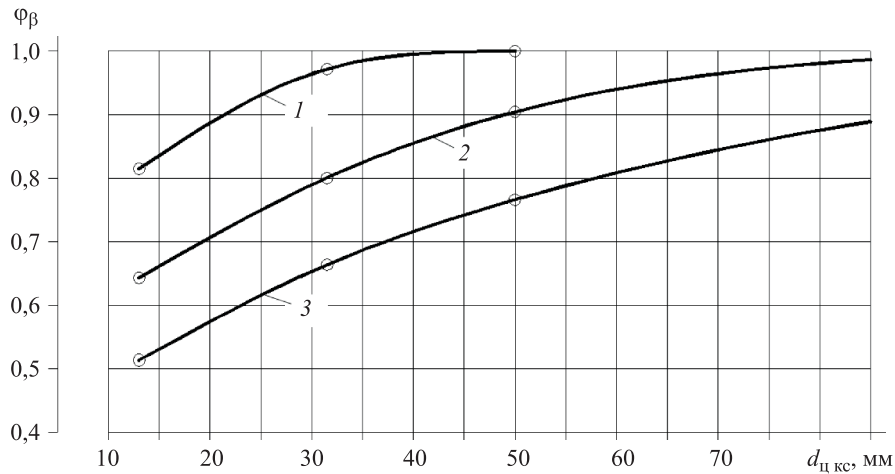


Рис. 6. Зависимость $\varphi_\beta = f(L_{ц \text{ КС}})$ для компонентов топлива кислород — этанол при $p_k = 0,5$ МПа, $\alpha = 0,64$ и при различных начальных диаметрах капель этанола: 1 — $d_k = 30$ мкм; 2 — $d_k = 40$ мкм; 3 — $d_k = 50$ мкм

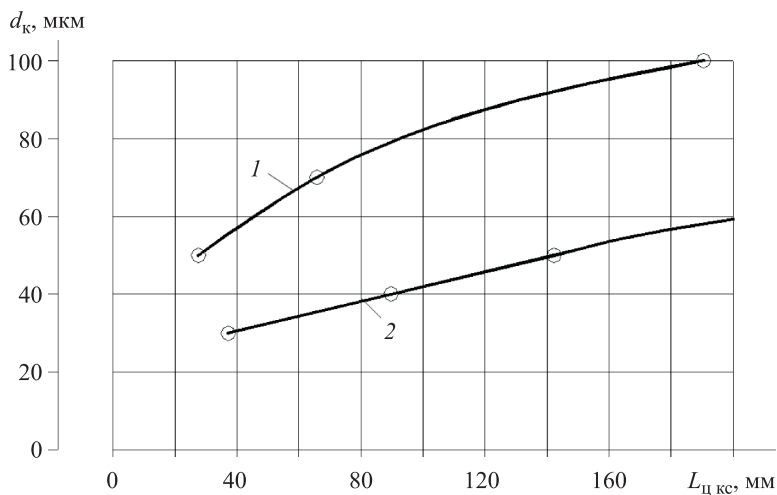


Рис. 7. Зависимость $d_{k \text{ min}} = f(L_{ц \text{ КС}})$ при $\varphi_\beta = 0,99$, $p_k = 0,5$ МПа, $\alpha = 0,64$: 1 — кислород — керосин; 2 — кислород — этанол

Зависимости $d_{k \min} = d_{k \min}(L_{ц \text{ КС}})$ для обеих пар компонентов представлены на рис. 7. На рисунке видно, что с увеличением длины цилиндрической части КС значение $d_{k \min}$ возрастает, что связано с увеличением времени пребывания капель жидкого горючего. Кроме того, кривая $d_{k \min} = d_{k \min}(L_{ц \text{ КС}})$ для этанола лежит ниже, чем для керосина, что свидетельствует о более эффективном сгорании керосина благодаря его более низкой теплоте фазового перехода при более высокой энтальпии.

При исследовании влияния соотношения компонентов на коэффициент расходного комплекса, когда диаметр капель жидкого горючего переменный, изучалась зависимость коэффициента расходного комплекса от α .

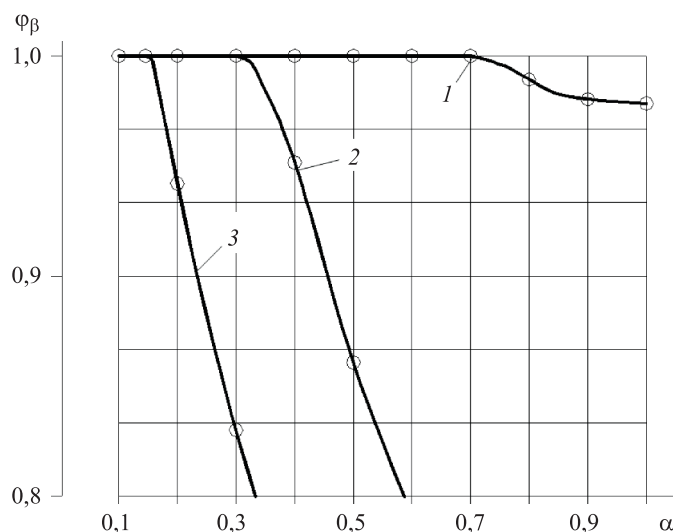


Рис. 8. Зависимость $\varphi_{\beta} = f(\alpha)$ для компонентов топлива кислород — этанол при $p_{к} = 0,5$ МПа и различных начальных диаметрах капель этанола:
 1 — $d_{к} = 30$ мкм; 2 — $d_{к} = 50$ мкм; 3 — $d_{к} = 70$ мкм

Зависимости $\varphi_{\beta} = \varphi_{\beta}(\alpha, d_{к})$ для пары этанол — кислород показаны на рис. 8. На рисунке видно, что при $d_{к} > d_{к \min}$ наблюдается существенное снижение коэффициента расходного комплекса с ростом α . Такое поведение кривых объясняется более эффективным горением обогащенных смесей, когда лимитирующим фактором становится не поступление паров горючего из капель в реагирующую газовую смесь, а наличие в этой смеси свободного кислорода. Кроме того, особенностью принятой математической модели является то, что избыточное горючее, подаваемое в КС, исключается из рассмотрения. Следовательно, не учитываются капли и пары жидкого горючего, не успевающие испариться или вступить в реакцию. Такой подход был принят в [1] в связи с тем, что при $\alpha < 1$ часть горючего физически

не может вступить в реакцию. Это обусловлено не качеством организации рабочего процесса, а особенностью задаваемых исходных условий (недостаточное количество кислорода для окисления подаваемого горючего). График, изображенный на рис. 8, позволяет сделать вывод, что для базового значения α при $d_k > d_{k \min}$ недостаточно тонкий распыл приводит к значительному снижению коэффициента расходного комплекса.

Зависимости $\varphi_\beta = \varphi_\beta(\alpha, d_k)$ для пары керосин — кислород представлены на рис. 9. Основные выводы о характере поведения кривых можно сделать такие же, как и с помощью данных, приведенных на рис. 8. Однако во всем диапазоне изменения α кривые на рис. 9 при сходных значениях d_k лежат выше кривых, изображенных на рис. 8. Поэтому сделанный ранее вывод о более эффективном протекании рабочего процесса для пары керосин — кислород может быть распространен на весь диапазон значений по α .

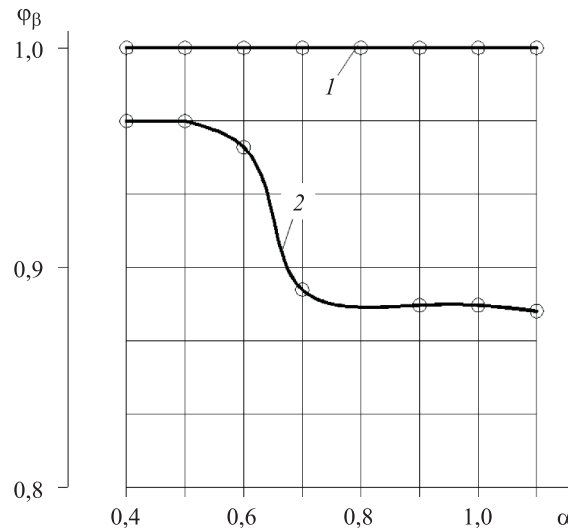


Рис. 9. Зависимость $\varphi_\beta = f(\alpha)$ для компонентов топлива кислород — керосин при $p_k = 0,5$ МПа и различных начальных диаметрах капель керосина:
1 — $d_k = 30$ мкм; 2 — $d_k = 50$ мкм

На этапе исследования влияния соотношения компонентов на коэффициент расходного комплекса при переменном давлении в КС изучались характеристики рабочего процесса в КС базовой геометрии (см. рис. 1) при отклонении от номинальных значений режимных параметров — соотношения компонентов и давления в камере сгорания.

Зависимости коэффициента расходного комплекса от давления в камере сгорания $\varphi_\beta = \varphi_\beta(p_k)$ для пары керосин — кислород при различных комбинациях режимных параметров изображены на рис. 10.

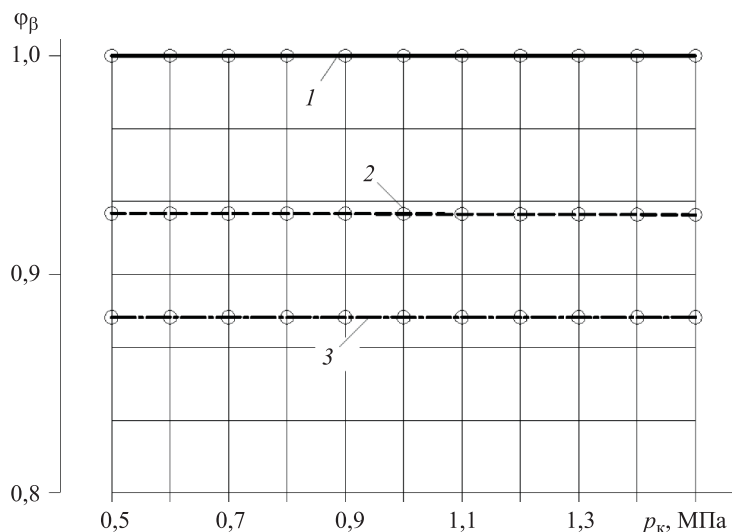


Рис. 10. Зависимость $\varphi_\beta = f(p_k)$ для компонентов топлива кислород — керосин:
 1 — $\alpha = 0,5$, $\alpha = 0,64$, $\alpha = 1,1$, $d_k = 50$ мкм; $\alpha = 0,5$, $d_k = 70$ мкм; 2 — $\alpha = 0,64$,
 $d_k = 70$ мкм; 3 — $\alpha = 1,1$, $d_k = 70$ мкм

Видно, что в соответствии с принятой математической моделью давление практически не влияет на характеристики рабочего процесса в КС. Это связано, в частности, с предположением об изначальной подаче в КС предварительно подготовленной газожидкостной смеси с монодисперсным составом капель жидкости. Таким образом, аэродинамические силы не оказывают влияния на подготовительные процессы дробления капель. Кроме того, при $d_k \leq d_{k \text{ min}}$ коэффициент расходного комплекса $\varphi_\beta = 1,0$ во всем исследованном диапазоне изменения p_k . Такая же закономерность наблюдается и для пары этанол — кислород. Физически это означает, что при тонком распыле капель жидкого горючего будет существенно ослабевать влияние на протекание рабочего процесса различия многих физических свойств жидких горючих, например, температуры кипения и теплоты фазового перехода, так как уже на начальных стадиях рабочего процесса происходит полное испарение этих капель.

В то же время при подаче в КС предварительно подготовленной смеси газообразного кислорода и капель жидкого горючего процесс смешения компонентов практически завершается уже во входном сечении, и в дальнейшем происходит полное сгорание топлива.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что для пары компонентов керосин — кислород при $d_k = 50$ мкм влияние тонкости распыла на φ_β элиминируется для всех α , тогда как для пары этанол — кислород и при $d_k = 30$ мкм наблюдается снижение φ_β для $\alpha > 0,8$.

Заключение. В результате проведенных комплексных исследований создана математическая модель для расчета характеристик рабо-

чего процесса в КС РДМТ для пар газообразный кислород — керосин и газообразный кислород — этанол. Проанализировано влияние отдельных свойств жидких горючих на характеристики рабочего процесса в КС РДМТ. Так, установлены предельные минимальные размеры капель $d_{k \min}$ для керосина и этанола, при которых влияние этого параметра на коэффициент расходного комплекса элиминируется. Выявлена различная степень влияния на коэффициент расходного комплекса длины КС при схожих диаметрах капель керосина и этанола. Получены зависимости и проведен сравнительный анализ влияния на коэффициент расходного комплекса режимных параметров — коэффициента избытка окислителя α и давления в камере сгорания p_k для этанола и керосина. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации режимно-геометрических характеристик при проектировании КС РДМТ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ягодников Д.А., Новиков А.В., Антонов Ю.В. Расчетные исследования по оптимизации схемы и параметров подачи компонентов топлива в камеру сгорания РДМТ на топливе газообразный кислород — керосин. *Наука и образование*, 2011, № 12, 13 с.
- [2] Ягодников Д.А., Чертков К.О., Антонов Ю.В., Новиков А.В. Численное исследование рабочего процесса в восстановительном газогенераторе кислород-метанового ЖРД разгонного блока. *Аэрокосмический научный журнал. Электрон. журн.*, 2015, № 5, с. 12–25. DOI: 10.7463/aersp.0515.0821899
- [3] Ягодников Д.А., Антонов Ю.В., Стриженко П.П., Быков Н.И., Новиков А.В. Исследование процесса течения кислорода в рубашке охлаждения камеры ЖРД. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 6, с. 3–19.
- [4] Андреев Е.А., Новиков А.В., Шацкий О.Е. Расчетное и экспериментальное исследование надежности запуска и выхода на режим ракетного двигателя малой тяги на газообразных компонентах кислород+метан с электроискровым зажиганием. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 4 (64). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-4-1606
- [5] Салич В.Л. Экспериментальные исследования по созданию ракетного двигателя малой тяги на топливе «газообразный кислород+керосин». *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2018, т. 17, № 4, с. 129–140. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-129-140
- [6] Салич В.Л. Разработка генератора активного газа газожеторной установки высотного огневого стенда. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*, 2019, т. 18, № 1, с. 118–127. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-118-127
- [7] Трусов Б.Г. *Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. «Астра — 4», версия 1.06, январь 1991. Описание.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992.
- [8] Дубовкин Н.Ф. *Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания.* Москва, Госэнергоиздат, 1962, 288 с.

- [9] Глушко В.П., ред. *Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник: в 10 т.* Москва, ВИНТИ АН СССР, 1971–1979, т. 1, 266 с.
- [10] Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.* 2-е изд. Москва, Наука, 1972, 720 с.
- [11] Госмен А.Д., Пан В.М., Ранчел А.К., Сполдинг Д.Б., Вольфштейн М. *Численные методы исследования течений вязкой жидкости.* Москва, Мир, 1972, 326 с.
- [12] Госмен А.Д., Халил Е.Е., Уайтлоу Дж. Расчет двумерных турбулентных рециркуляционных течений. В кн.: *Турбулентные сдвиговые течения.* Москва, Машиностроение, 1982, т. 1, с. 247–268.

Статья поступила в редакцию 22.11.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Новиков А.В., Андреев Е.А., Бардакова Е.И. Численное исследование влияния физико-химических свойств жидкого горючего на эффективность рабочего процесса ракетного двигателя малой тяги. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-12-2138>

Новиков Артур Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований течения жидкости и газа в сложных структурных средах. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Андреев Евгений Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области двухфазных течений в газовом тракте ракетных двигателей и методологии диагностики рабочих процессов в ракетных и реактивных двигателях. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Бардакова Елена Ивановна — аспирант кафедры «Ракетные двигатели», инженер НИИ ЭМ и кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Баумана. Область научных интересов: экспериментально-теоретические исследования течения жидкости и газа в ЖРД. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Numerical study of the influence of the physicochemical liquid fuel properties on the efficiency of the low-thrust rocket engine working process

© A.V. Novikov, E.A. Andreev, E.I. Bardakova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Low-thrust rocket engines are widely used in rocket and space technology for correcting the position of a spacecraft in orbit, for controlling motion along a trajectory, etc. Their number in the propulsion system can be from one to tens of units. Accordingly, the efficiency of their work significantly affects the perfection of the propulsion system as a whole. The object of the study was the low-thrust rocket engine combustion chamber operating according to the gas-liquid scheme. There were performed computational and parametric studies of various factor effects on the characteristics of the working process in the combustion chamber. The dependences of the coefficient of the consumable complex and parameters of the working process of the low-thrust rocket engine chamber on the influencing factors when using ethanol and kerosene as a fuel were calculated. A comparative analysis of the results of using these two components under similar conditions was carried out, which made it possible to reveal the influence of the physicochemical properties of the combustible component on the efficiency of the working process organization. The results obtained can be used in the design of low-thrust engines operating on the kerosene–oxygen and ethanol–oxygen propellants.

Keywords: combustion chamber, chamber ratio, mathematical model

REFERENCES

- [1] Yagodnikov D.A., Novikov A.V., Antonov Yu.V. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tekhicheskiy zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2011, no. 12, 13 p.
- [2] Yagodnikov D.A., Chertkov K.O., Antonov Yu.V., Novikov A.V. *Aerokosmicheskiy nauchnyy zhurnal — Aerospace Scientific Journal*, 2015, no. 5, pp. 12–25.
- [3] Yagodnikov D.A., Antonov Yu.V., Strizhenko P.P., Bykov N.I., Novikov A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2014, no. 6, pp. 3–19.
- [4] Andreev E.A., Novikov A.V., Shatsky O.E. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 4 (64). DOI: 10.18698/2308-6033-2017-4-1606
- [5] Salich V.L. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye — VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 129–140. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-4-129-140
- [6] Salich V.L. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye — VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2019, vol. 18, no. 1, pp. 118–127. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-118-127
- [7] Trusov B.G. *Modelirovanie khimicheskikh i fazovykh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh. “Astra-4”. Versiya 1.06, yanvar 1991g.* [Modeling chemical and

- phase equilibria at high temperatures. "Astra-4". Version 1.06, January 1991]. Moscow, BMSTU Publ., 1992, 6 p.
- [8] Dubovkin N.F. *Spravochnik po uglevodorodnym toplivam i ikh produktam sgoraniya* [Handbook of hydrocarbon fuels and their combustion products]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962, 288 p.
- [9] Glushko V.P., red. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya: Spravochnik v 10 tomakh. Tom 1* [Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products: Handbook in 10 vols., vol. 1]. Moscow, VINITI AN SSSR Publ., 1971, 266 p.
- [10] Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 720 p.
- [11] Gosman A.D., Pun W.M., Runchal A.K., Spalding D.B. Wolfshtein M. *Heat and Mass Transfer in Recirculating Flows*. London, Academic Press Publ., 1969 [In Russ.: Gosman A.D., Pun W.M., Runchal A.K., Spalding D.B. Wolfshtein M. *Numerical methods for studying viscous fluid flows*. Moscow, Mir Publ., 1972, 326 p.].
- [12] Gosman A.D., Khalil E.E., Whitelaw J.H. The calculation of two dimensional turbulent recirculating flows. *Proceedings of the 1st Symposium on Turbulent Shear Flows. Turbulent Shear Flows*, 1979, vol. 1, no. 13, pp. 237–255 [In Russ.: Gosman A.D., Khalil E.E., Whitelaw J.H. Raschet dvumernykh turbulentnykh retsirkulyatsionnykh techeniy. V kn.: *Turbulentnyye sdvigovyye techeniya*. Ginevsky A.S., red. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, vol. 1, pp. 247–268].

Novikov A.V. (b. 1962) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1985, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University; author of over 20 research publications in the field of experimental and theoretical studies of liquid and gas flow in complex structural media. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Andreev E.A. (b. 1961) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1984, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University, author of over 30 research publications in the field of two-phase flows in the gas path of rocket engines and techniques for diagnosing working processes in rocket and jet engines. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Bardakova E.I. (b. 1980) graduated from Bauman Moscow State Technical University; Engineer, Research Institute of Power Engineering and Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: experimental and theoretical studies of the liquid and gas flow in a liquid-propellant rocket engine. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru